

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Ney, Marcel; Rackwitz, Frank

1g Modellversuche mit granularen Säulen in organischen Böden

Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105147>
Originalveröffentlichung Tagungsband "Ohde-Kolloquium 2018": <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-237547>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Ney, Marcel; Rackwitz, Frank (2018): 1g Modellversuche mit granularen Säulen in organischen Böden. In: Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik (Hg.): Aktuelle Themen der Geotechnik (Ohde-Kolloquium 2018). Mitteilungen 24. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik. S. 143-158.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



1g Modellversuche mit granularen Säulen in organischen Böden

Dipl.-Ing. Marcel Ney, Prof. Dr.-Ing. Frank Rackwitz

*Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Berlin*

In diesem Beitrag wird auf das Bodenverbesserungsverfahren mit nichtummantelten granularen Säulen in weichen organischen Böden eingegangen. Hierbei liegt der Untersuchungsschwerpunkt auf der Frage, ob in solchen anspruchsvollen Böden mit geringer undrainierter Scherfestigkeit der Einsatz von nichtummantelten Sandsäulen praktikabel ist. Es besteht im Allgemeinen die Befürchtung des Versagens derartiger Säulen aufgrund zu geringer radialer Stützwirkung des umgebenden Baugrundes. Anhand von klein- und großmaßstäblichen 1g Modellversuchen soll untersucht werden, welchen Einfluss wesentliche Parameter wie die Säulenherstellungsmethode als auch das gewählte Flächenverhältnis auf das Tragverhalten haben. Weiterhin soll der Frage nachgegangen werden, ob es zu einem Versagen durch Säulenausbauchung kommen kann. Die Ergebnisse der Modellversuche werden auf in situ Verhältnisse extrapoliert und den Prognosen eines gängigen analytischen Bemessungsverfahrens gegenübergestellt.

1 Einleitung

Die kontinuierliche Erschließung von neuen Wohn-, Gewerbe- als auch Industriegebieten und damit die stetige Zunahme des Verkehrsaufkommens hat zur Folge, dass Gebiete gequert werden müssen, welche bisher auf Grund ihrer schwierigen Untergrundverhältnisse gemieden wurden. Hierzu zählen in erster Linie Gebiete mit weichen bindigen als auch organischen Ablagerungen. Gebiete mit großflächigen organischen oberflächennahen Ablagerungen (Hoch- und Tiefmoore) sind in Deutschland vorrangig im Norden anzutreffen, siehe Abbildung 1.

Angesichts der Ausweitung derartiger Ablagerungen im Rahmen einer Baumaßnahme können verschiedene Baugrundverbesserungsmaßnahmen sinnvoll und wirtschaftlich

sein. Bei sehr begrenzten Ablagerungen kann ggf. ein Bodenaustausch in Betracht gezogen werden. Ist ausreichend Zeit und Schüttmaterial vorhanden, dann kann eine großflächige Vorkonsolidierung mit anschließendem Rückbau eine mögliche Alternative darstellen.

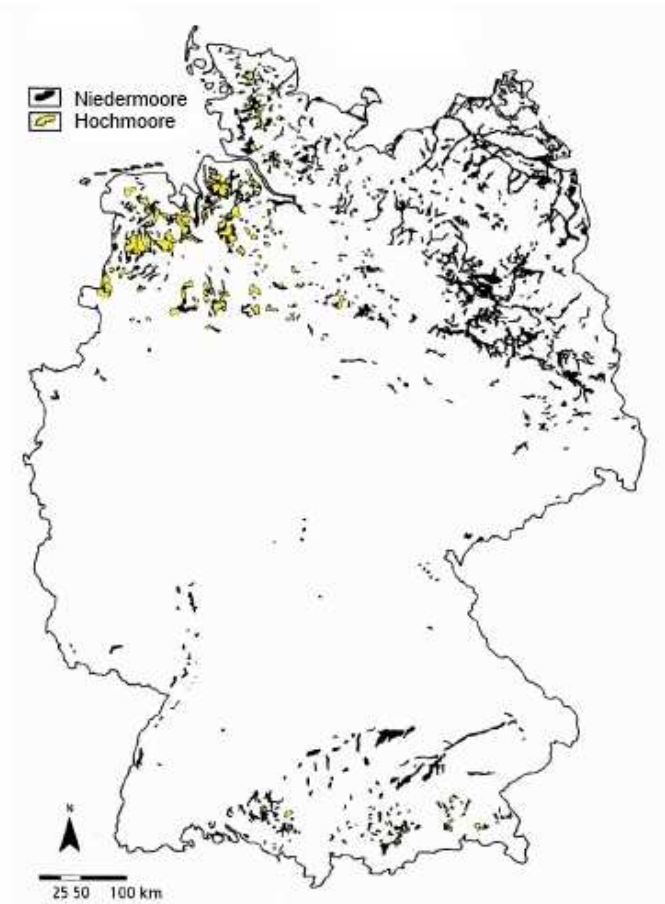


Abbildung 1: Mooregebiete in Deutschland. (Quelle: Länderfachbehörden, 2011: Positionspapier „Potentiale und Ziele zum Moor- und Klimaschutz“)

Eine weitere Möglichkeit der Baugrundverbesserung im benannten Fall ist die Einbringung von granularen Säulen. Hier gibt es diverse Herstellungsmöglichkeiten als auch Bemessungsansätze. Die Bemessung derartiger Baugrundverbesserungen muss eine Vielzahl an Parametern berücksichtigen. Neben den bodenphysikalischen und bodenmechanischen Parametern ist auch der Herstellvorgang eines Säulenrasters mit zusätzlichen Parametern zu berücksichtigen. Auf Grund der Vielzahl an Einfluss nehmenden Parametern ist es schwierig, analytisch eine verlässliche Prognose der erzielbaren Baugrundverbesserung zu geben. Hinzu kommt, dass der überwiegende Teil an Bemessungsansätzen für mineralische Böden aufgestellt wurde, wobei Einflüsse nicht

berücksichtigt werden können, die vor allem bei organischen Böden auftreten können. Hier sei vor allem die Berücksichtigung des langzeitlichen Kriechverhaltens als auch der Einfluss des Herstellungsverfahrens der granularen Säulen genannt. Grundsätzlich steht die Frage zur Diskussion, ab welchem Wert der undrainierten Scherfestigkeit c_u der Einsatz von granularen Säulen möglich ist.

2 Gründungsverfahren mit granularen Säulen

2.1 Rüttelstopf- und Rütteldruckverfahren

Anfang der 30er Jahre des 20. Jahrhunderts erhielt die heutige Firma Keller Grundbau GmbH ein Patent für ein vorgestelltes Tiefenrütteldruckverfahren. Dieses Verfahren wurde für Lockergesteine (Kiese, Sande) entwickelt, bei welchem über Vibration eine Eigenverdichtung des Baugrundes erzielt wurde. Erste Ansätze zur Ausbildung von granularen Säulen erfolgten hierbei durch Zugabe von granularem Material während der Trichterausbildung [KK10].

In den 70er Jahren wurde dieses Verfahren um einen patentierten Schleusenrüttler erweitert. Dieser Schleusenrüttler konnte mit granularem Material bestückt und in vorgegebener Tiefe gezielt entleert werden. Durch Vibration des Schleusenrüttlers und kontinuierliche Auf- und Abwärtsbewegungen konnten definierte, verdichtete granulare Säulen hergestellt werden. Dieses Verfahren ist bekannt als Rüttelstopfverfahren und kommt vorwiegend in weichen bindigen Böden zum Einsatz, wobei der Einsatz über den gesamten Bereich der Lockergesteine möglich ist [KK10].

Zur Dimensionierung von Baugrundverbesserungen mit Rüttelstopfverdichtungen hat sich über die letzten Jahrzehnte das Verfahren nach Priebe etabliert, welches erstmalig 1976 [Pri76] vorgestellt wurde. Im gleichen Zeitraum wurde für den Einsatz des Rüttelstopfverfahrens eine untere Anwendungsgrenze in Bezug auf die undrainierte Scherfestigkeit des umgebenden Bodens von $c_u = 15 - 25$ kPa festgelegt.

2.2 Sandsäulen

Im asiatischen Raum, vorrangig in Japan, wurde das System der nichtummantelten Sandsäulen, auch benannt als Sandverdichtungspfähle (engl. Sand Compaction Pile „SCP“), entwickelt. Dieses System kam ursprünglich mit nichtverdichteten Sandsäulen zum Einsatz, um Konsolidierungsvorgänge zu beschleunigen bzw. das Verflüssigungspotential locker gelagerter Ablagerungen zu reduzieren, ohne hierbei eine lastabtragende Wirkung zu erzielen. Im Laufe der Zeit wurde dieses Verfahren um die Verdichtung der Sandsäulen mit dem Ziel erweitert, dass auch anteilig den Sandsäulen

ein lastabtragender Anteil zugeschrieben werden konnte. In Abbildung 2 sind aus [Kit05] entnommen die wesentliche zeitliche Entwicklung der Sandsäulen und deren mögliche Einsatzgebiete dargestellt.

Improvement principle	Engineering method	Work examples	Period practical application introduced									
			1930s	1940s	1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s		
Replacement	Excavation replacement	Dredging replacement method										
	Forced replacement	Sand compaction pile method				1966						
Consolidation	Preloading	Preloading method	1928									
	Preloading with vertical drain	Sand drain method			1952							
		Packed sand drain method				1967						
		Board drain method				1963						
	Dewatering	Deep well method		1944								
		Well point method			1953							
		Vacuum consolidation method					1971					
	Chemical dewatering	Quick lime pile method				1963						
Densification	Dewatering/compaction	Sand compaction pile method			1957							
		Gravel compaction pile method				1965						
	Compaction	Vibro-flotation method			1955							
		Impact compaction					1973					
Solidification (Admixture stabilization)	Agitation mixing	Shallow mixing method					1972					
		Deep mixing method					1974					
	Jet mixing	Jet mixing method						1981				
Contact pressure reduction	Load distribution	Fascine mattress method										
		Sheet net method				1962						
		Sand mat method										
		Surface solidification method					1970					
	Balancing loads	Counterweight fill method										

Abbildung 2: Geschichtliche Entwicklung der SCP Methode, aus [Kit05]

[Rai99] stellt in seiner Arbeit das System der geotextilummantelten Sandsäulen vor. Das System der ummantelten Sandsäulen wurde experimentell (klein- und großmaßstäbliche 1g Modellversuche) in organischem Boden (Torf) untersucht. Schwerpunkte hierbei sind die Untersuchung des einzusetzenden Geotextils und eine Erarbeitung eines entsprechenden Bemessungsverfahrens. Das Geotextil soll in erster Linie die als unzureichend angenommene radiale Stützwirkung des zu verbessernden Bodens kompensieren.

[Rai99] als auch [Sch12] stellen in ihren Arbeiten verschiedene Projekte vor, bei denen geotextilummantelte Sandsäulen eingesetzt wurden. Des Weiteren greift [Sch12]

aber auch ein Projekt (Bundesstraße 96) auf, bei dem auf einer Länge von ca. 150 m nichtummantelte Sandsäulen als Baugrundverbesserung einer organischen Ablagerung (Torf, Mudde) eingesetzt wurden. Diesen Einsatz der nichtummantelten Sandsäule hat [Sch12] in seiner Arbeit näher untersucht und hierzu sowohl klein- als auch großmaßstäbliche 1g Modellversuche durchgeführt, siehe Abbildung 3.

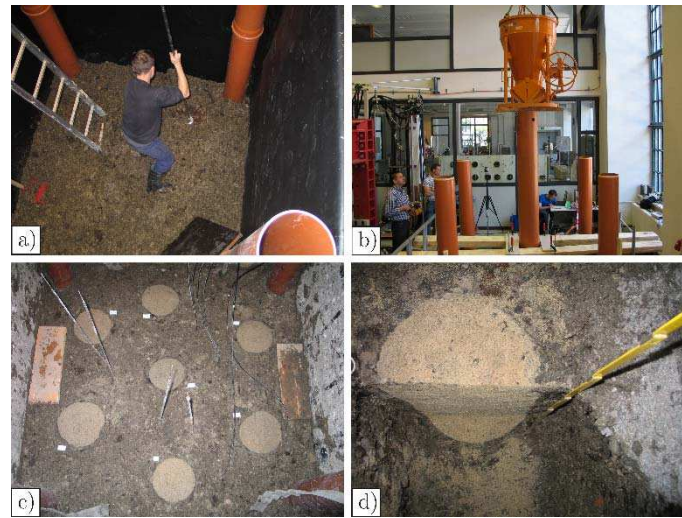


Abbildung 3: Großmaßstäblicher 1g Modellversuch im Rahmen der Forschungstätigkeit Prof. Dr.-Ing. M. Schüßler, aus [Ney18]

2.3 Analytische Bemessungsverfahren

Im deutschsprachigen Raum hat sich das Bemessungsverfahren nach Priebe etabliert, welches erstmals in [Pri76] veröffentlicht wurde. Diese Veröffentlichung stellt die Grundlage für weitere Veröffentlichungen von Priebe dar, in welchen der ursprüngliche Bemessungsansatz erweitert und Vereinfachungen relativiert wurden.

Grundsätzlich beruht das Bemessungsverfahren nach Priebe auf dem Ansatz der Einheitszelle, siehe Abbildung 4. Vereinfacht wird ursprünglich angenommen, dass der umgebende Baugrund sich isotrop verhält und der horizontale Erddruck als Flüssigkeitsdruck wirkt. Das Setzungsverhalten wird als elastisch angesehen, das Säulenmaterial als inkompressibel und im Bruchzustand mit aktiver Erddruckwirkung auf den umgebenden Baugrund. Das Gewicht des Baugrundes als auch des Säulenmaterials wird vernachlässigt. Weiterführende Anpassungen des ursprünglichen Bemessungsansatzes berücksichtigen die Kompressibilität des Säulenmaterials als auch die Eigengewichte des Baugrundes und des Säulenmaterials. Das Ergebnis der Bemessung ist

der sogenannte Baugrundverbesserungswert n , der die Setzung des unverbesserten Ausgangsbodens auf die Setzung des ertüchtigten Baugrunds bezieht (Gleichung 3).

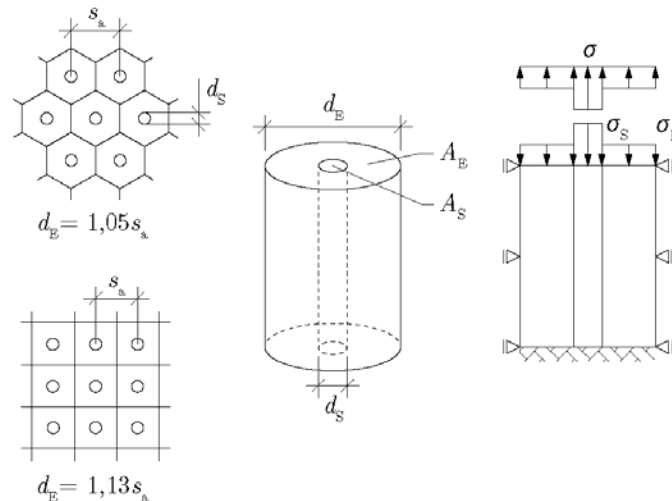


Abbildung 4: Einheitszelle, nach [Kir04]

3 1g Modellversuche

Modelle als auch Modellversuche im normalen Erdschwerefeld (1g) können in verschiedene Gruppen eingeordnet werden. Abbildung 5 veranschaulicht vier unterschiedliche Modelltypen. Modelle können als reine Anschauungsmodelle konzipiert sein, um wesentliche Zusammenhänge oder Abläufe darzustellen. Ein Demonstrationsmodell (Abbildung 5 a) soll einen mechanischen Zusammenhang demonstrieren. Abbildung 5 b) zeigt ein Holzkeilmodell, welches die Ausbildung von Erdkeilen bei aktivem oder passivem Erddruck veranschaulicht bzw. demonstriert. Im weiteren Sinne entspricht es auch dem Modell in Abbildung 5 c), dem sogenannten Analogmodell. Es wird ein Material für die Abbildung des Baugrundes verwendet, welches in stark vereinfachter Form ein analoges Verhalten wie der Baugrund aufweist. Die Durchführung von Analogmodellversuchen ist meist einfacher in deren Vorbereitung. Die Reproduzierbarkeit von Versuchsergebnissen ist auf Grund der gewählten einfachen Materialien höher als bei der Versuchsdurchführung mit realen Böden. Wird dennoch realer Boden mit vereinfachter Abbildung von Gründungskörpern oder ähnlichem gewählt, so werden diese Modelle bzw. Modellversuche Realmodelle genannt (Abbildung 5 d).



Abbildung 5: a) Anschauungsmodell b) Demonstrationsmodell
c) Analogmodell d) Realmodell, aus [Ney18]

Neben diesen Modellformen, welche im normalen Erdschwerefeld ($1g$) durchgeführt werden, gibt es noch die Modellversuchsdurchführung in geotechnischen Zentrifugen. Der Vorteil hierbei ist die künstliche Erhöhung des Erdschwerefeldes ($n g$) durch Ausnutzung der Fliehkraft, welche in einer Zentrifuge auf das Modell einwirkt. Nachteilig hierbei ist der meist in einer Zentrifuge sehr beengte Platz, was die Modellgröße beschränkt und die dadurch erschwerte Modellvorbereitung als auch Instrumentierung.

Der Vorteil von $1g$ Modellversuchen liegt in deren frei wählbaren Größe, der guten Instrumentierbarkeit als auch einfachen Versuchsdurchführung. Der wesentliche Nachteil von $1g$ Modellversuchen ist das geringe Spannungsniveau, welches in einem Modellversuchsaufbau herrscht. Bodenphysikalische Parameter wie die Scherfestigkeit oder auch das Dilatanzverhalten sind druckabhängig. Diese Nachteile können kompensiert werden, indem der Einfluss des Druckes in verschiedenen Maßstäben untersucht wird. Der Maßstab ist definiert als das Verhältnis einer Abmessung in situ zur Abmessung im Modell. Modellversuche in verschiedenen Maßstäben können dann zu Modellfamilien zusammengeführt werden und somit der Einfluss des Spannungsniveaus berücksichtigt werden. In der Modelltheorie, basierend auf der Dimensionsanalyse, werden physikalische Größen über deren Dimensionen (Länge, Masse, Zeit) in Zusammenhang gebracht, wenn ein Einfluss einer Skalierung der zu untersuchenden Fragestellung vorliegt (verkleinerte Modellbildung). Über die Festlegung

sich nicht ändernder Bezugsgrößen während einer Modellversuchsdurchführung, beispielsweise eine sich nicht ändernde Abmessung oder eine konstant bleibende Wichte, werden physikalische Größen skaliert, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Modellgesetze

Physikalische Größe	Dimension	Einheit	Modellgesetz
Länge	L	m	$l_M = l_P/\lambda$
Kraft	K	kN	$F_M = F_P/\lambda^3$
Spannung	K/L^2	kN/m ²	$\sigma_M = \sigma_P/\lambda$
Wichte	K/L^3	kN/m ³	$\gamma_M = \gamma_P$
Dehnung	-	-	$\varepsilon_M = \varepsilon_P$

3.1 Durchgeführte 1g Modellversuche

Im Rahmen eines DFG Forschungsprojektes soll an den bis dahin vorliegenden Erkenntnissen aus Forschungsarbeiten zum Thema der Baugrundverbesserung weicher organischer Böden mit Sandsäulen angeschlossen werden. Ziel ist es, in verschiedenen Maßstäben die erzielbare Baugrundverbesserung mit nichtummantelten Sandsäulen zu untersuchen. Es soll untersucht werden, ob organische Böden mit geringer undrainierter Scherfestigkeit eine ausreichende Stützwirkung auf die nichtummantelten Sandsäulen aufbringen können oder ob es zum Säulenversagen in Form von Ausbauchungen kommt. Auch ein möglicher Einfluss erhöhter radialer Stützwirkung auf Grund von Bodenverdrängung bei Säulenherstellung ist in seiner Auswirkung zu untersuchen.

Als wesentliche einflussnehmende Parameter wurde das gewählte Flächenverhältnis a_s , d. h. die Grundrissfläche des Säulenmaterials bezogen auf die gesamte Grundrissfläche des Modellausschnitts, sowie die Säulenherstellungsmethode festgelegt. Diese Parameter wurden im Rahmen der durchgeführten Modellversuche variiert. Der Einfluss des Flächenverhältnisses a_s wurde in einem Bereich von 10,1 % bis 30 % untersucht. Die Sandsäulenherstellung wurde als Bodenersatzverfahren (BE) bzw. als Bodenverdrängungsverfahren (BV) durchgeführt. Es wurde gedanklich von einer typischen Trassenführung (Dammschüttung) über eine organische Ablagerung ausgegangen. Die im Bereich Säulenoberkannte herrschende Vertikalspannung soll 100 kPa betragen. Als Baugrundverbesserung soll ein Säulenraster aus nichtummantelten

Sandsäulen dienen. Jede Säule hat eine Länge von 5 m und weist eine Schlankheit von 4,6 auf. Die Sandsäulen stehen auf einem im Verhältnis sehr steifen Untergrund auf, das Grundwasser steht bis zur Geländeoberkannte an.

Es wurden 11 kleinmaßstäbliche und 9 großmaßstäbliche Modellversuche durchgeführt. Als Modellform bieten sich verschiedene Ansätze an, siehe Abbildung 6. Da das Interesse an einer direkten Beobachtung des Säulenverhaltens bestand, wurden die kleinmaßstäblichen Modellversuche in Form eines ebenen Modells durchgeführt, die großmaßstäblichen Modellversuche hingegen als Rasterausschnitt. Die Modellversuche wurden in einem Maßstabsbereich von $\lambda = 14,3 - 4,3$ durchgeführt.

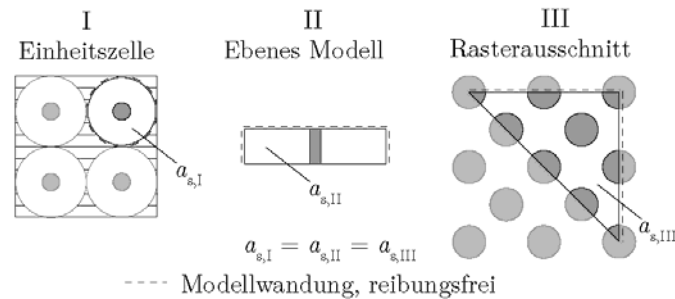


Abbildung 6: Mögliche Varianten zur Modellbildung von Baugrundverbesserungen mit granularen Säulen, aus [Ney18]

Abbildung 7 stellt beide Modellversuchsaufbauten schematisch dar. Die Instrumentierung mit Messwertgebern beschränkte sich bei den kleinmaßstäblichen Modellversuchen auf Grund der geringen Abmessungen auf die lotrechte Wegmessung im Kopfbereich der Sandscheibe. Hingegen konnten die großmaßstäblichen Modellversuche in fünf Messebenen mit Messwertgebern ausgestattet werden. So wurden Horizontal- als auch Vertikalspannungen, Porenwasserdrücke und Setzungen gemessen und aufgezeichnet.

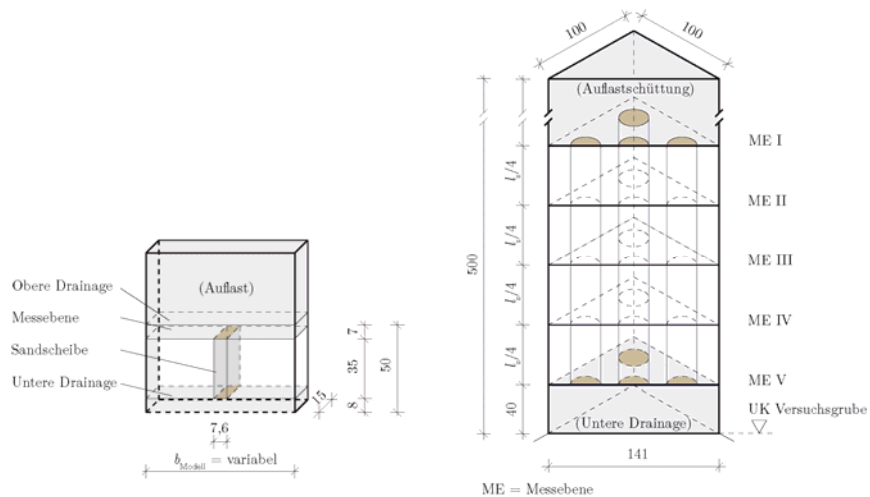


Abbildung 7: Klein- und großmaßstäbliche Modellversuche – Schematische Darstellung, links: kleinmaßstäblich, rechts: großmaßstäblich, aus [Ney18]



Abbildung 8: Klein- und großmaßstäbliche Modellversuche – links Modellkasten für kleinmaßstäbliche Modellversuche, rechts: Säulenherstellung (BV) bei großmaßstäblichem Modellversuch, aus [Ney18]

Für alle Modellversuche wurde ein organischer Mischboden verwendet, welcher einen organischen Anteil $V_{gl} = 42,5 \%$ und eine Korndichte $\rho_s = 1,96 \text{ g/cm}^3$ aufweist. Dieser Mischboden wurde aus einem handelsüblichen Hochmoortorf und einem Flusssediment (Greifswald, Fluss Ryck) hergestellt. Als Säulenmaterial wurde ein

enggestufter Sand (SE) mit einer Krümmungszahl $C_C = 0,9$ und Ungleichförmigkeitszahl $C_U = 3,1$ gewählt. Dessen kritischer Reibungswinkel wurde mit $\varphi'_c = 31,5^\circ$ bestimmt.

Die Versuchsdurchführung bei allen Versuchen hat sich in vier Abschnitte aufgeteilt: Einbau des Versuchsbodens, Vorkonsolidierung des Versuchsbodens, Herstellung der Sandsäulen, Belastung in vier Schritten.

Zur größtmöglichen Reduzierung der Wandreibung wurden die Wandungen der Modellkästen vor dem Bodeneinbau mit einer Schmierseife bestrichen und mit einer dünnen Folie abgedeckt. Der Versuchsboden wurde in breiiger Konsistenz sowohl bei den kleinmaßstäblichen als auch den großmaßstäblichen Modellversuchen mit einem mittleren Wassergehalt von $w_E = 235\%$ eingebaut. Hierdurch konnte eine gute Homogenität und Reproduzierbarkeit erzielt werden. Der eingebaute breiige organische Boden wurde bei den kleinmaßstäblichen Modellversuchen für eine Dauer von 48 h unter einer Vertikallast von 0,75 kPa vorbelastet, bei den großmaßstäblichen wurde für eine Dauer von 7 d unter 2 kPa vorbelastet. Nach Abschluss der Vorkonsolidierung wurden oberflächennah Sonderproben entnommen als auch bei den großmaßstäblichen Modellversuchen der Flügelscherwiderstand in drei Ebenen bestimmt.

Die Säulenherstellung im Bodenverdrängungsverfahren erfolgte im Anschluss mit Verdrängungskörpern, siehe Abbildung 8. Diese Verdrängungskörper wurden mit „verlorener“ Spitze bis in die untere Drainageschicht eingebracht. Anschließend wurden die Verdrängungskörper mit Sand gefüllt und gezogen. Im Mittel wurde bei den Sandsäulen eine Trockendichte $\rho_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$ erzielt, welche einer lockeren bis mitteldichten Lagerung entspricht. Die Säulenherstellung im Bodenersatzverfahren unterscheidet sich vom Bodenverdrängungsverfahren in der Hinsicht, dass zuerst die Verdrängungskörper in die Modellkästen eingestellt wurden und anschließend der breiige organische Boden eingebaut und vorkonsolidiert wurde. Nach Abschluss der Vorkonsolidierung wurden die Verdrängungsrohre mit Sand gefüllt gezogen.

Nach der Herstellung der Sandsäulen wurde die Belastung als Schüttung in vier Stufen aufgebracht. Die kleinmaßstäblichen Modellversuche wurden alle 48 h weiterbelastet, die großmaßstäblichen Modellversuche alle 5 d. Nach Abschluss der Gesamtbelastungsphase wurde die Aufschüttung zurückgebaut und wiederum Sonderproben oberflächennah entnommen und Flügelscherfestigkeiten in drei Messebenen bestimmt.

3.2 Ergebnisse der durchgeführten 1g Modellversuche

Die undrainierten Flügelscherwiderstände wurden bei den großmaßstäblichen Modellversuchen nach der Vorkonsolidierung vor der Säulenherstellung („Beginn“),

nach erfolgter Säulenherstellung („n.S.H.“) als auch nach Versuchsende („Ende“) bestimmt, siehe Abbildung 9. Es ist erkennbar, dass der Wert des Flügelscherwiderstandes bei Säulenherstellung ca. 5 kPa betrug und während der Versuchsdurchführung auf einen mittleren Wert von ca. 8 – 12 kPa anstieg.

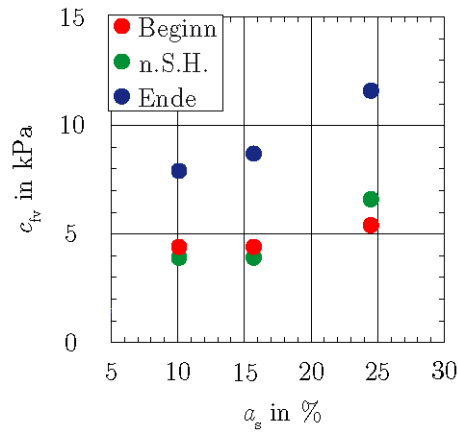


Abbildung 9: Großmaßstäbliche Modellversuche, Bodenverdrängungsverfahren (BV) – Flügelscherwiderstände, aus [Ney18]

Abbildung 10 und Abbildung 11 stellen normiert die Primärsetzungen nach jeder Schüttstufe dar.

$$\sigma_{v,norm.} = \frac{\sigma_v}{\gamma_s h_0} \quad (1)$$

$$s_{norm.} = \frac{s_{mittel}}{h_0} \quad (2)$$

Die Diagramme sind jeweils unterteilt nach dem Säulenherstellungsverfahren (links: BE, rechts: BV). Es ist sowohl bei den klein- als auch großmaßstäblichen Modellversuchen erkennbar, dass das gewählte Flächenverhältnis a_s einen wesentlichen Einfluss auf das Setzungsverhalten aufweist. Das Säulenherstellungsverfahren hat hingegen einen nicht sehr ausgeprägten Einfluss.

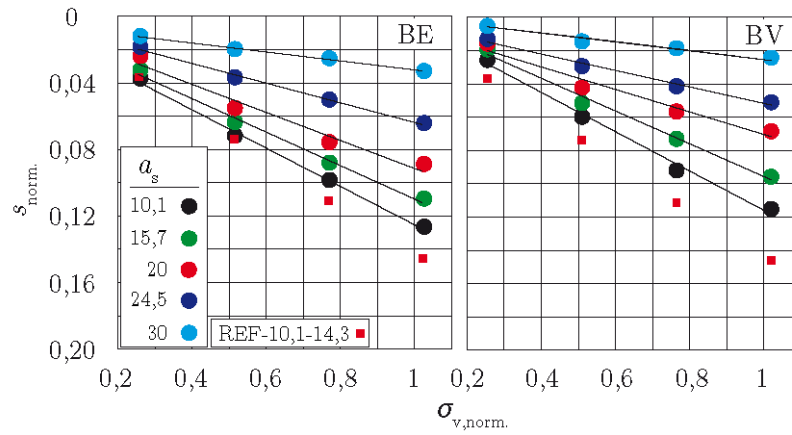


Abbildung 10: Kleinmaßstäbliche Modellversuche (BE, BV) – Setzungen, normiert, aus [Ney18]

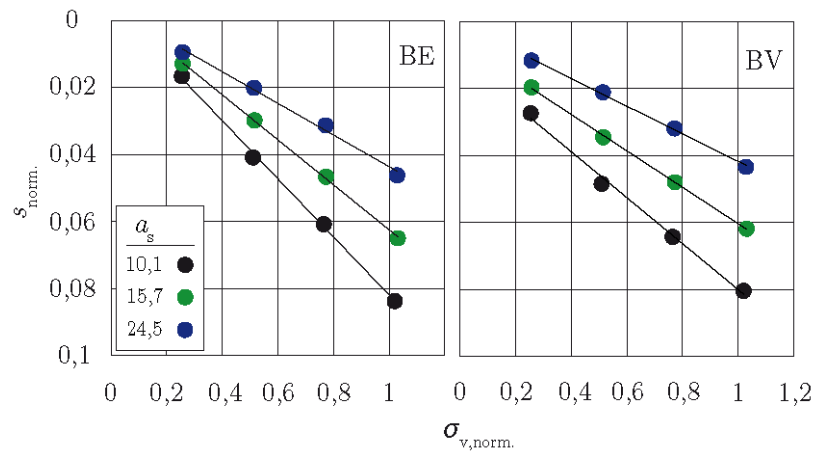


Abbildung 11: Großmaßstäbliche Modellversuche (BE, BV) – Setzungen, normiert, aus [Ney18]

Die Ergebnisse der Setzungsmessungen wurden auf in situ Verhältnisse ($\lambda = 1$) extrapoliert und stellen auf Basis der Modellversuche eine Prognose zum erwarteten Setzungsverhalten des Prototyps dar, siehe Tabelle 2. Die Tabelle zeigt die zu erwartenden Primärsetzungen, unterteilt nach dem gewählten Flächenverhältnis a_s , als auch unterteilt nach der gewählten Säulenherstellungsmethode. Des Weiteren sind die zu erwartenden Setzungen des unverbesserten Baugrundes aufgeführt. Bei der Extrapolation wurde davon ausgegangen, dass in situ der gleiche organische Boden ansteht.

Tabelle 2: Prototyp – Extrapolierte Primärsetzungen

	Flächenverhältnis a_s		
	10,1	15,7	24,5
Bodenersatz	43 cm	33 cm	13 cm
Bodenverdrängung	38 cm	28 cm	8 cm
Unverbessert	53 cm		

Die Baugrundverbesserung wird allgemein als Verhältnis der Setzung des unverbesserten Baugrundes zu der Setzung des ertüchtigten Baugrundes angegeben:

$$n = \frac{s_{\text{unverbessert}}}{s_{\text{verbessert}}} \quad (3)$$

In Tabelle 3 sind die zu erwartenden extrapolierten Werte der Baugrundverbesserung n dargestellt. Des Weiteren sind die mit dem Bemessungsverfahren nach Priebe ermittelten Werte der zu erwartenden Baugrundverbesserung mit aufgeführt. Man erkennt, dass mit bei geringem Flächenverhältnis a_s die Prognose als auch die Extrapolation relativ gut übereinstimmen. Mit steigendem Flächenverhältnis zeigen die Extrapolationen jedoch die Tendenz, über den Prognosen nach Priebe zu liegen. Die Extrapolationen für eine Säulenherstellung im Bodenverdrängungsverfahren nehmen mit steigendem Flächenverhältnis stärker zu als die der Säulenherstellung im Bodenersatzverfahren und übersteigen die Prognose nach Priebe um das Dreifache.

Tabelle 3: Prototyp – Baugrundverbesserung n

	Flächenverhältnis a_s		
	10,1	15,7	24,5
Priebe n_{Priebe}	rd. 1,3	rd. 1,6	rd. 2,0
Bodenersatz n_{BE}	1,2	1,6	4,1
Bodenverdrängung n_{BV}	1,4	1,9	6,6

In Abbildung 12 a) sind die Werte der extrapolierten Baugrundverbesserung und die Werte der Prognose nach Priebe dargestellt. Abbildung 12 b) stellt die Normierung der Versuchsergebnisse auf den jeweiligen Wert nach Priebe dar.

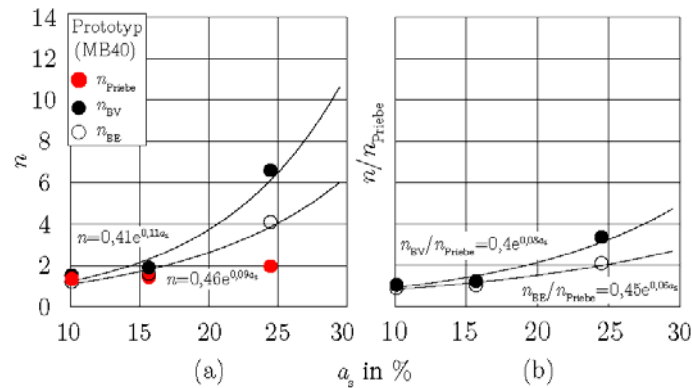


Abbildung 12: a) Extrapolierte Baugrundverbesserung, abhängig vom Säulenherstellungsverfahren b) Normierte Darstellung, aus [Ney18]

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag werden klein- und großmaßstäbliche 1g Modellversuche zur Untersuchung der Einsetzbarkeit von nichtummantelten Sandsäulen in weichen organischen Böden vorgestellt. Insgesamt wurden 20 Modellversuche in einem Maßstabsbereich von $\lambda = 14,3 - 4,3$ mit einem organischen Mischboden durchgeführt. Hierbei wurde einerseits das gewählte Flächenverhältnis in einem Bereich $a_s = 10,1 - 30\%$ variiert als auch die Säulenherstellungsmethode (Bodenersatz bzw. Bodenverdrängung). Die Auswertung der Modellversuche zeigt, dass die nichtummantelten Sandsäulen trotz der geringen undrainierten Scherfestigkeit des Modellbodens weitestgehend formstabil blieben und nicht durch Ausbauchen versagten. Der Einfluss des Säulenherstellungsverfahrens zeigte sich ab einem Flächenverhältnis a_s von rd. 16 %. Ab diesem Wert zeigen die Modellversuche mit Sandsäulen, hergestellt im Bodenverdrängungsverfahren, ein steiferes Verhalten als die Versuche mit Säulen, hergestellt im Bodenersatzverfahren.

sollen eine Grundlage bilden, um Die Erkenntnisse der hier vorgestellten Modellversuche sollen auf weiche organische Böden übertragen werden, welche sowohl höhere als auch niedrigere organische Anteile aufweisen als der hier genutzte organische Mischboden. Diese Übertragung auf Böden mit anderen organischen Anteilen kann eine Grundlage bilden, um bestehende analytische Bemessungsverfahren in ihrer Anwendbarkeit auf weichen organischen Baugrund und den Einsatz von nichtummantelten Sandsäulen zu erweitern.

Literatur

- [Kir04] KIRSCH, Fabian: *Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Rüttelstopfsäulengruppen*. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2004
- [Kit05] KITAZUME, Masaki: *The Sand Compaction Pile Method*. Leiden: Balkema Publ., 2005. – ISBN 0415372127
- [KK10] KIRSCH, Klaus; KIRSCH, Fabian: *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods*. CRS Press, 2017. – ISBN 9781482257564
- [Ney18] Ney, Marcel: *Nichtummantelte Sandsäulen in weichen Böden mit hohem organischen Anteil*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2018 (eingereicht.)
- [Pri76] Priebe, Heinz J.: *Abschätzung des Setzungsverhaltens eines durch Stopfverdichtung verbesserten Baugrundes*. In: Bautechnik 53 (1976), Nr. 5, S. 160–162.
- [Rai99] Raithel, Marc: *Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen*. Kassel, Universität Gh Kassel, Dissertation, 1999
- [Sch12] Schübler, Maik: *Untersuchungen zum Verformungsverhalten von Untergrundverbesserungen mit Sandsäulen in Böden mit organischen Anteilen*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2012